



航天器环境工程

SPACECRAFT ENVIRONMENT ENGINEERING

——中国科技核心期刊

火星表面微生物存活的潜力和限制因素分析

马玲玲 袁俊霞 党磊 徐侃彦 杨金禄 印红

Analysis of potential and restricting factors of microbial survival on the Martian surface

MA Lingling, YUAN Junxia, DANG Lei, XU Kanyan, YANG Jinlu, YIN Hong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12126/see.2023173>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

AIT阶段微生物灭菌技术在行星保护任务中的应用与发展

Application and development of microbial reduction technology in the AIT stage for planetary protection

航天器环境工程. 2021, 38(6): 707–714 <https://doi.org/10.12126/see.2021.06.015>

模拟火星大气环境对典型柔性结构热防护特性的影响

Influence of simulated Martian atmosphere environment on the thermal protection performance of typical flexible structures

航天器环境工程. 2019, 36(1): 15–21 <https://doi.org/10.12126/see.2019.01.003>

稳压CO₂气体氛围火星环境模拟试验系统设计

Design of Mars environmental simulation system with pressure-stable gaseous CO₂ atmosphere

航天器环境工程. 2019, 36(4): 398–402 <https://doi.org/10.12126/see.2019.04.017>

一种基于直流式风洞的火星尘暴模拟装置

Design of a Martian dust storm simulator based on open return wind tunnel

航天器环境工程. 2024, 41(2): 123–128 <https://doi.org/10.12126/see.2023118>

火星进入器气动热环境模拟及热防护试验综述

Review of aerothermal environmental simulations and thermal protection tests for Mars entry vehicles

航天器环境工程. 2022, 39(5): 522–532 <https://doi.org/10.12126/see.2022.05.012>

火星探测器全任务期空间环境特征与防护要点

Space environment characteristics and key points in space environmental protection design for Mars probe mission

航天器环境工程. 2019, 36(6): 542–548 <https://doi.org/10.12126/see.2019.06.003>

火星表面微生物存活的潜力和限制因素分析

马玲玲¹, 袁俊霞¹, 党磊¹, 徐侃彦², 杨金禄², 印红^{1*}

(1. 航天神舟生物科技集团有限公司 北京市空间生物工程技术研究中心, 北京 100090;

2. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100086)

摘要: 评估微生物在地外行星表面的存活状况是深空探测活动中实施地外生命探测和行星保护的前提条件之一。文章分析了火星表面环境特征及其对微生物存活的影响, 以及在火星探测活动中微生物存活的潜力; 归整出可用于微生物对火星环境适应性研究的模拟平台和地面环境模拟设备, 并指出要模拟真实火星环境仍需改进多功能模拟设备。研究微生物在火星环境中存活和适应机制对于地外生命探测、地外生物安全风险评估以及深空探测工程应用有重要意义。

关键词: 火星表面环境; 微生物存活; 行星保护; 空间火星环境模拟平台; 地面火星环境模拟设备
中图分类号: V42 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-1379(2024)04-0404-10

DOI: [10.12126/see.2023173](https://doi.org/10.12126/see.2023173)

Analysis of potential and restricting factors of microbial survival on the Martian surface

MA Lingling¹, YUAN Junxia¹, DANG Lei¹, XU Kanyan², YANG Jinlu², YIN Hong^{1*}

(1. Beijing Space Bioengineering Technology Research Center, Shenzhou Space Biotechnology Group, Beijing 100190, China;

2. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100086, China)

Abstract: The assessment of the microbial survival status on the superior planet surface is one of the prerequisites of the detection of extraterrestrial life and the implementation of planetary protection in deep space exploration activities. The characteristics of the Martian surface environment and their impact on the microbial survival, as well as the potential for microbial survival in Mars exploration activities were analyzed in this paper. The space simulation platforms and ground-based simulation facilities used for studying the microbial adaptability to the Martian environment were reviewed. It is concluded that the multi-functional simulation facilities would need to be improved to simulate the real Martian environment. The proposed research is of significance for extraterrestrial life detection, extraterrestrial biosafety risk assessment, and deep space exploration engineering applications to study the microbial survival and adaptation mechanisms in the Martian environment.

Keywords: Martian surface environment; microbial survival; planetary protection; space Martian environmental simulation platform; ground-based Martian environmental simulation facility

收稿日期: 2023-12-01; 修回日期: 2024-08-16

基金项目: “天问三号”关键技术攻关项目; 空间站工程航天技术试验领域项目; 载人空间站工程空间科学与应用项目 (编号: SCP03-01-06); 北京空间飞行器总体设计部实验室基金项目

引用格式: 马玲玲, 袁俊霞, 党磊, 等. 火星表面微生物存活的潜力和限制因素分析[J]. 航天器环境工程, 2024, 41(4): 404-413
MA L L, YUAN J X, DANG L, et al. Analysis of potential and restricting factors of microbial survival on the Martian surface[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2024, 41(4): 404-413

0 引言

在太阳系行星中,火星的环境条件与地球的最相似^[1-2],研究火星上可能存在的生命以及评估火星的潜在宜居性是科学界关注的重点,也是火星探测的重要目的。为保证科学研究的严谨性,火星探测需要遵守行星保护的规则,即采用适宜的微生物控制技术进行前向污染防治以保证探测结果的正确性;同时,也应避免将未知的地外物质带回地球,对地球生物圈造成危害^[3]。

火星表面的极端环境条件包括强辐射、极低的温度、极稀薄的大气层、干旱和高盐等^[4-6]。理论上,这种极端条件使得火星表面环境无法支持生命存活,但地球上西伯利亚永久冻土^[7]、高温海底热液喷口^[8]、沙漠或高盐湖泊^[9]等极端环境中微生物生命体的大量发现拓宽了人类对陆地微生物生命极限的认知,推测某些微生物可能具备适应或耐受火星环境的能力。因此,了解火星环境特征及其对微生物存活和生长的影响,评估微生物在火星表面的存活能力,对于了解微生物在火星的生命潜力以及行星保护中对微生物防控措施的选择具有重要意义。

本文将综合火星环境的观测数据、实验室的模拟实验结果以及极端环境下微生物研究的成果,评估微生物在火星表面存活的潜力和限制因素,为制定合适的行星保护规则以及地外生命探测的研究提供参考。

1 火星表面环境特征及其对微生物的影响

1.1 电离辐射环境的影响

火星表面的电离辐射包括来自银河宇宙射线(GCRs)和太阳能量粒子的初级带电粒子^[10-11],还包括初级带电粒子与火星大气层以及地面土壤作用后生成的中子和 γ 射线等次级粒子。由于太阳能量粒子的产生具有随机性,其发生的时间和辐射剂量大小不定,所以,大部分时间火星表面电离辐射环境主要来自银河宇宙射线。

目前对火星表面电离辐射环境进行过原位探测的是NASA的“火星奥德赛号”(Mars Odyssey)和“好奇号”火星车携带的探测器,测得的火星表面辐射剂量分别为80 mGy/年和76 mGy/年^[12-13]。我国“天问一号”火星探测器也携带了火星能量粒子

分析仪,用于探测、分析离子能谱和通量等^[14]。火星原位探测的范围受限,且火星表面辐射剂量的估算受大气屏蔽、太阳活动期、天顶角、附加屏蔽及粒子在大气中传输差异等各方面影响,因此,还可以选择通过建立数学模型来模拟不同条件下的银河宇宙射线能谱,进而估算火星表面电离辐射剂量。采用不同的数学模型估算的GCRs在火星表面年辐射剂量范围在几十到几百mGy之间^[15-16]。

电离辐射是抑制微生物存活的重要因素之一。有研究表明,微生物的耐 γ 电离辐射极限约为20~25 kGy,能承受如此高辐射剂量的物种较少^[17-18]。在经受10 kGy的剂量辐照后,枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)、多色节杆菌(*Arthrobacter polychromogenes*)、玫瑰色考克氏菌(*Kocuria rosea*)的存活数量降低3~4个数量级,而耐辐射奇球菌(*Deinococcus. Radiodurans*)的存活数量降低不到1个数量级^[17,19]。

相比微生物纯培养物,以群落形式存在的微生物对电离辐射的耐受性大大增强。在火星表面陆地模拟场,以40 kGy的 γ 射线辐照模拟电离辐射摩洛哥山区沙漠土壤样本以及南极多年冻土样本,细菌数量只减少1~2个数量级^[20];以100 kGy的 γ 射线辐照北极多年冻土样本,细菌数量只减少2个数量级^[21]。相对于火星表面几十到几百mGy/年的辐射剂量,上述地面模拟研究中使用了相当于火星上几百年到几十万年的极高剂量在几天至几周内释放,故可以推测,火星表面的电离辐射在短时间对其上微生物的影响非常有限。

1.2 太阳紫外辐射环境的影响

火星表面的太阳紫外辐射波长介于200~400 nm之间,包括UV-A(315~400 nm)、UV-B(280~315 nm)和UV-C(200~280 nm)。目前,火星表面的紫外辐照度大多通过地面遥感检测或地面建立的数学模型估算得出(如表1所示)^[22-24],尚没有关于火星原位紫外辐照度探测数据的报道。火星表面接收到的太阳总辐射能量是地球的44%,但由于地球的大气层过滤掉了绝大多数波长<300 nm的紫外线,而火星大气中的二氧化碳吸收了绝大多数波长<190 nm的紫外线,导致火星表面190~300 nm的紫外辐射比地球表面更多^[25-27]。

表 1 火星/地球表面的太阳紫外辐照度^[22-24]Table 1 Solar ultraviolet irradiance on the surface of Mars/Earth^[22-24]

太阳紫外辐射波段	紫外辐照度/(W·m ⁻²)	
	火星	地球
UV-A(315~400 nm)	31.1~41.5	52.81~89.28
UV-B(280~315 nm)	7.9~8.38	2~19.49
UV-C(200~280 nm)	3.4~5	≈0

注:表中仅反映火星或地球表面部分区域的辐照度,不包含火表、地表特殊位置的紫外辐照度。

太阳紫外辐射是火星表面最主要的生物破坏因素^[28-29],其中对微生物杀灭效应最强的是 UV-C 波段,其能够诱发生物体 DNA 链中相邻的嘧啶碱基产生嘧啶二聚体,阻碍 DNA 的复制和碱基的正常配对,进而影响转录及蛋白质的生物功能。有研究表明,用 UV-A+UV-B 波段紫外线辐照使芽孢数量减少 90% 所用的时间是全波谱紫外辐照所用时间的 35 倍,证明了 UV-C 波段紫外线的主要生物杀灭效应^[30]。由于火星表面 UV-C 波段紫外通量远高于地球表面,对微生物的杀灭作用也更强,目前尚无被检测的微生物能够经受长时间的紫外辐射的报道,例如:芽孢杆菌的内生孢子,作为空间试验最常使用的生物模型,虽具有极强的空间环境耐受能力,但在模拟火星太阳紫外辐射下 15 min 即全部被杀死^[22];另一种耐干燥、耐辐射的细菌为蓝细菌,其干燥细胞在紫外辐射下 30 min 后被全部杀死^[29]。

需要指出的是,上述研究是利用纯培养微生物在没有任何遮挡的条件下进行的,但是在火星探测的实际过程中,许多环境因素会导致紫外辐射被屏蔽,使微生物免受直接紫外辐照,对微生物起到保护作用,大大增加了微生物的存活率和存活时间,从而使微生物具有在火星表面存活的潜力。

1) 火星尘埃、土壤的屏蔽

深空探测过程中,探测器落于火星表面的瞬间撞击以及火星上可能出现的沙尘暴天气,均可能使探测器表面被火星尘埃沉积物覆盖。据报道,“海盗 1 号”着陆器的 3 号着陆垫上布满火星尘埃^[12](如图 1 所示),假如微生物位于被尘埃粒子覆盖的着陆器部件上,则可以避免直接接受火星太阳紫外辐射,进而会影响火星表面微生物的生存能力。有研究描述了灰尘对紫外线照射下细菌存活的影响:一般认为细菌在 5~10 μm 或更大的灰尘颗粒的屏蔽下存活率显著增加^[31-33];覆盖在不同粒径和厚度

的尘埃下的枯草芽孢杆菌菌株 HA101 的芽孢和嗜冷杆菌,随着尘埃粒径和厚度的增加,其存活时间延长,存活率增加^[25,34]。与将灰尘层置于细菌顶部相比,将枯草芽孢杆菌的芽孢直接混合到细粒灰尘或土壤中会得到更好的抗紫外辐射保护^[35]。在国际空间站的 EXPOSE-R2 任务中暴露在类似火星环境 722 天的干燥蓝细菌,只有与火星土壤模拟物 P-MRS(页硅化火星风化层模拟物)和 S-MRS(硫酸盐火星风化层模拟物)混合的得以存活^[36]。上述数据表明,有一层厚度仅几 μm 的尘埃保护,便可使微生物在紫外辐射下存活率增加,因此未经消毒或消毒不彻底的航天器可能成为火星表面长期污染的潜在来源。

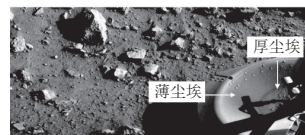
图 1 “海盗 1 号”着陆器着陆垫上的尘埃^[12]

Fig. 1 Dust on the landing pad of Viking-1 lander

2) 航天器材料的保护

附着在航天器内部不同部位的微生物在飞行过程中会受到硬件材料和结构的保护,遮挡导致的辐射减弱会增加微生物在火星环境中的存活率。一些研究结果表明,暴露在着陆航天器表面的细菌在阳光下会被紫外线迅速杀死,而隐藏在航天器内部或下方的细菌则可能会逃脱这些致命射线^[34,37]。此外,在航天器建造和组装过程中,微生物可能被封装在聚合航天器材料(如黏合剂和涂层)中:包埋在聚合物中的芽孢仍可以保持萌发和培养能力^[38];封装在环氧树脂黏合剂中的非产芽孢菌(包括抗辐射不动杆菌、耐辐射球菌和木糖葡萄球菌)也有少量可存活^[39]。这说明某些微生物足够顽强,能够在航天器材料的封装中存活下来,并可能被带往火星。

3) 微生物自身的防护作用

微生物自身或者不同微生物之间的累积覆盖也会导致紫外辐射杀灭效应的衰减。在国际空间站持续 559 天的舱外暴露试验中,多层芽孢样品中的下层芽孢由于上层芽孢的遮盖而免受辐照,存活率较单层芽孢样品高几个数量级^[40]。地面模拟火星表面紫外辐照对枯草芽孢杆菌 HA101 芽孢的作用也发现,单层芽孢在累计 12 kJ/m² 的辐照剂量下全部

被杀灭,而多层芽孢中的下层芽孢在上层芽孢的紫外屏障下无法被杀灭^[22,31]。此外,自然环境中存在的微生物最可能以生物群落的形式存在,也即最可能受生物膜的保护。生物膜是被多糖、蛋白质、脂质等组成的细胞外聚合物(EPS)包裹的有组织的微生物群体^[41],在面对环境压力因素时,EPS的产生可以帮助微生物承受极端的温度和盐度,提高养分利用率,并能提供保护以减小紫外辐射损害^[42-43]。微生物以生物膜的存活方式比浮游状态下更适合在火星环境下长期生存。在 EXPOSE-R2 任务中模拟火星环境下测试地热球菌在生物膜和浮游样品中的生存能力发现,生物膜中可培养菌的比例高于浮游样品中的,且经历极端环境后生物膜中细菌的膜完整性只发生轻微变化,而浮游细菌的膜完整性严重丧失^[44]。在模拟太空和火星极端环境下对两株蓝细菌的研究也表明该细菌在生物膜中的存活率比浮游生物样品中的更高^[45]。可见,在生物膜中的微生物比浮游样品中的更能承受极端环境压力。为了对抗火星表面辐射等恶劣环境,微生物通常通过形成突变或生物膜等来获得抗辐射等多种生存优势^[46],这无疑将提升其对抗火星极端条件的极限,使其可能在火星条件下存活。

1.3 高盐环境的影响

火星表面存在多种高浓度的无机盐,2008年美国 NASA“凤凰号”着陆器上的湿化学实验室(WCL)发现了高氯酸盐的存在,其浓度为 0.4~0.6 wt%^[47]，“好奇号”探测器上火星仪器(SAM)的样本分析结果支持这一发现^[48]。2015年火星勘测轨道飞行器的光谱仪在被认为是盐水渗漏的位置检测到 NaClO₄、Mg(ClO₄)₂ 和 Mg(ClO₃)₂ 的水合盐^[49]。在火星土壤中发现的盐还包括氯化钠、硫酸镁、硫酸钙、硫酸亚铁、氯化镁和氯化钙^[50],据估计,含硫盐比氯化盐在火星表面更常见,二者的比例为 4:1^[51]。

盐会影响水的活性,高盐浓度会对生物的细胞系统造成渗透压力。然而研究表明,火星表面的高盐环境几乎不会影响微生物的存活,微生物有能力承受火星高盐环境,在短期暴露后仍会生长繁殖。枯草芽孢杆菌 HA101 的芽孢单层沉积在铝试片上,并在模拟火星环境(690 Pa, 10 °C, CO₂ 气体)下

覆盖 1 mm 厚的高盐土壤模拟层 7 天后,芽孢数量仅略有减少^[52];“凤凰号”着陆点浮土组合物的土壤模拟物也用于评估对枯草芽孢杆菌 168 和短小芽孢杆菌 SAFR-032 芽孢的萌发和生长的影响,在用 Lysogeny Broth 培养基改良的土壤模拟提取物中,长达 5 h 的芽孢萌发和生长没有受到抑制^[53]。另一项研究中,NASA 观察到从航天器装配设施中分离出来的常见微生物芽孢杆菌和葡萄球菌在 -3 °C 的 3%KCl 中均有生长^[54]。用浓度 0.6 wt% 的高氯酸盐溶液模拟火星环境,研究芽孢杆菌营养体、大肠杆菌和液化链球菌的存活,发现 3 种细菌的存活率均无显著变化,能耐受高浓度的高氯酸盐^[55]。然而,有研究表明,枯草芽孢杆菌营养体在模拟火星紫外线(波长 254 nm)下暴露于高氯酸盐后的存活率,与仅受紫外辐照的对照组相比,后者超过前者的 9.7 倍^[56],说明火星紫外照射会增强高氯酸盐的杀菌作用。

1.4 火星表面其他环境因素的影响

低压是火星表面的重要环境特征,火星大气的压力约为 700 Pa。微生物对压力环境的适应范围更广,如萎缩芽孢杆菌在 17 Pa 条件下分别暴露 1 h 和 7 天,菌株的存活率与对照组相比无明显变化;暴露在 1.6×10^{-3} Pa 条件下 1 h、 7.6×10^{-6} Pa 条件下 7 天,菌株的存活率与对照组相比也无明显变化^[57]。一般芽孢暴露于 1000 Pa 模拟火星低压环境中几小时、几天、数周或几个月,芽孢存活降低不到 1 个数量级^[22]。

火星表面其他极端环境包括 -125 ~ 20 °C 的极大温差环境、高浓度 CO₂、几乎无氧且干燥的大气环境等,其中的单一环境因素均会对微生物存活有一定影响,但无法完全杀灭微生物。例如,地热球菌在 -10 °C 和 45 °C 的温度条件下进行 132 个循环或在干燥条件下,其存活率均未受到显著影响^[44]。

2 空间火星环境模拟实验平台

由于火星缺乏内在磁场,表面稀薄的大气(6 g/cm²)对辐射的屏蔽能力极弱,所以火星几乎是持久地暴露于太阳宇宙辐射和银河宇宙辐射中,同时也暴露于偶发的太阳粒子事件辐射场中。这与空间站运行轨道的辐射环境特点极为相似,因此空间

站舱外暴露实验平台是开展模拟火星环境下的微生物实验的理想平台。

自20世纪80年代以来,国外已发射了20多种舱外空间暴露实验平台,前期的平台以研究空间环境对材料(特别是航天器件材料)的影响以及实时监测空间环境因素为主,后来NASA的LDEF、欧空局的EXPOSE系列、俄罗斯的BIORISK-MSN、BIOPAN等逐步开展了空间环境对生物的累积损伤效应的空间暴露实验^[58-59]。下面以EXPOSE系列暴露实验装置为例进行介绍。自2008年开始,在国际空间站上连续进行了EXPOSE-E、EXPOSE-R、EXPOSE-R2三次天体生物学暴露任务,其中EXPOSE-E搭载于欧空局“哥伦布”实验舱外的EuTEF平台上,EXPOSE-R、EXPOSE-R2搭载在俄罗斯“星辰”舱(Zvezda)外的URM-D平台上,3个暴露实验设施主要的结构、功能基本相同。EXPOSE-E的核心飞行硬件(如图2所示^[60])是一个箱形结构,

由3个实验托盘组成,根据实验需求可选择透射波长 $\lambda > 110 \text{ nm}$ 或 $\lambda > 200 \text{ nm}$ 的太阳紫外辐射。为了监测环境,EXPOSE-E核心设施配备了包括紫外线传感器、辐射计(Dexter 6M)、R3DE剂量仪以及温度传感器在内的多种传感器。EXPOSE-E的托盘1和3模拟空间真空、 $\lambda > 110 \text{ nm}$ 的太阳紫外辐射、宇宙电离辐射和温度波动,而托盘2模拟火星表面环境条件,包括约1000 Pa的气压、 $\lambda > 200 \text{ nm}$ 的太阳紫外辐射、火星大气(95.55%CO₂, 2.70%N₂, 1.60%Ar, 0.15%O₂, 0.037%H₂O)、温度波动(-20~59℃)以及155~180 mGy的宇宙电离辐射^[60]。利用EXPOSE暴露设施开展了多项微生物在太空和类似火星环境条件下生存能力的测试研究,涉及的微生物包括芽孢杆菌、地衣、木霉、聚球菌、蓝细菌和南极隐石黑色真菌等^[36, 40, 61-62],同时开展了评价陨石材料对芽孢的保护作用^[63]以及生物膜^[64]、微生物群落^[65]在类似火星环境条件下的生存能力等研究。

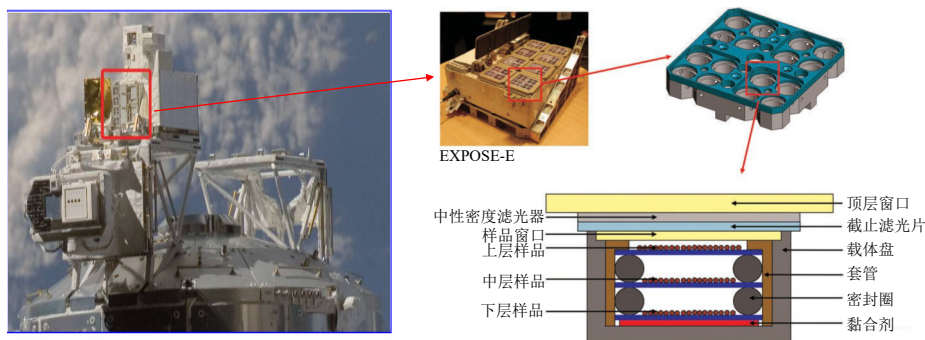


图2 EXPOSE-E空间暴露设施^[60]

Fig. 2 Space exposure facility EXPOSE-E^[60]

2023年,我国自主研制的首个面向舱外生物实验的空间辐射生物学暴露实验装置(如图3所示)在中国空间站“梦天”舱外暴露平台上完成安装并全面启动了在轨暴露实验。该装置包括中央控制子系统、环境测量子系统、样品生保子系统和样品观测子系统,可为各类样品提供所需的温度和气体环境,可持续监测样品和样品环境状态,并测量空间带电粒子辐射和太阳紫外辐射数据。暴露实验样品包括线虫、植物种子、微生物和有机分子等生物样品,旨在研究极端环境下微生物的空间耐受性、辐射损伤预警防护、空间辐射遗传变异及生命起源与进化等问题^[66-67]。

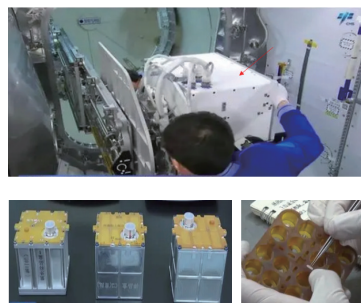


图3 中国空间站空间暴露实验装置^[66-67]

Fig. 3 Space exposure facility in China Space Station^[66-67]

3 地面火星环境模拟设备

为克服空间实验资源的限制,许多地面火星环境模拟设备也被用于地面对照实验或者预先研究

分析。这些火星环境模拟设备的发展经历了从简单模拟设备到复杂多功能模拟设施的转变，尤其是近年随着研究需求的增加，火星环境模拟设备也在不断改进，其功能更加复杂，环境模拟更加精确，能够模拟火星的温度、压力、气体成分、紫外辐射和电离辐射等，有些甚至能够模拟磁场、含水量、尘埃等不同环境条件^[68-71]。当前的火星模拟设备一般是不锈钢制成的腔室(如图 4 所示)，由 CO₂(95.3%)、N₂(2.7%)、Ar(1.7%)、O₂(0.2%)和 H₂O(0.03%)组成的模拟火星大气混合气体可在腔室内循环；紫外辐射通常由安装在腔室外部的氙弧灯产生，通过光纤束分配紫外光；由液氮回路冷却样品板控制局部温度^[22]。现已利用这些地面火星环境模拟设施开展了大量的研究(见表 2)。然而，火星的真实环境非常复杂，目前的模拟设施很难完全予以模拟，因

此仍需要不断改进现有设备，以更全面、准确地探索火星环境对微生物生命的影响。

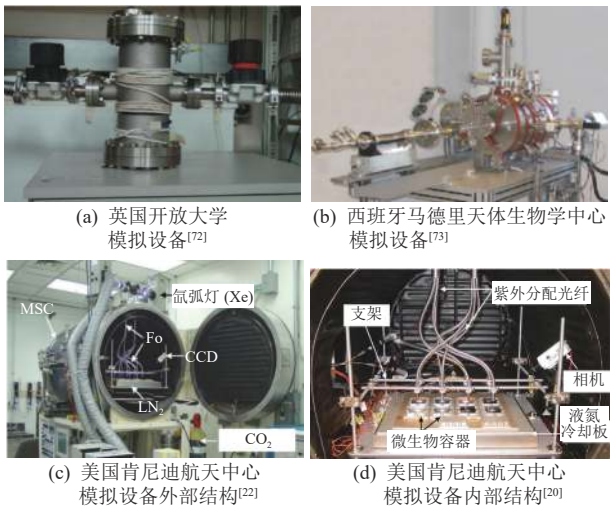


图 4 火星环境模拟设施^[20, 22, 72-73]
Fig. 4 Martian environmental simulation facility^[20, 22, 72-73]

表 2 近年用于开展微生物研究的火星环境模拟设备

Table 2 Martian environmental simulation facilities used for microbial research in recent years

模拟设施	所属机构	微生物研究应用
火星环境模拟舱	美国肯尼迪航天中心	研究模拟火星条件对单层芽孢的存活影响；进行生命极限试验 ^[22]
行星和空间模拟设备	德国宇航中心	研究耐辐射球菌在模拟火星纬度60°的夏季条件下的生存能力以及火星土壤的防护作用 ^[74]
热物理火星模拟设备	德国宇航中心	研究地衣在模拟火星条件下的活性和光合活力 ^[75]
行星气候模拟室	西班牙马德里天体生物学中心	嗜酸硫杆菌和耐辐射奇球菌在模拟火星环境下的生存能力以及火星风化层类似物对细菌生存的保护作用 ^[73] ；研究地衣在模拟火星环境中的生存能力和抗性 ^[76]
火星环境模拟舱	意大利帕多瓦大学	测试细菌在模拟昼夜和季节性火星周期热循环以及紫外线辐射下的存活率 ^[77]
火星环境模拟室	英国开放大学	研究模拟火星条件下休眠状态的蓝细菌的存活状况 ^[72]
火星环境模拟舱	奥地利科学院空间研究所	开展嗜盐古细菌的生存实验 ^[78]

4 结束语

本文以微生物为重点关注对象，结合火星表面的环境因子，分析了微生物在火星表面存活的潜力和限制因素，认为太阳紫外辐射是微生物在地外存活的主要杀灭因素。微生物作为在火星等地外环境下开展存活和适应性研究的经典模式生物，评估其对地外环境的适应性对于在地外生命探测、地外生物安全风险评估以及深空探测工程应用有重要意义，具体如下：

1)地外生命探测主要涉及生命起源与演化、地外宜居环境、生命信号识别等科学问题。在寻找地外生命的过程中，微生物提供了重要的生命信号识别线索。利用微生物研究其是否有可能在地外环境下存活和逃逸，对于地外生命探测有重要意义。

2)微生物引发的生物安全问题囊括了在地外环境下微生物对设备、人员及食品等的潜在影响。为了对抗密闭、资源匮乏、辐射等不利环境，微生物通常会形成突变或生物膜等保护机制，通过组学大数据，关注微生物从基因型到表型的空间响应机制，将对评估潜在的空间生物安全风险，制定合理科学的风险规避和控制措施提供参考。

3)火星原位资源利用是深空探测领域的研究焦点。利用微生物的生物催化或生物转化能力，将火星表面的土壤或岩石中的元素或化合物转化为氧气、水和有机物等可用的材料和资源，为火星探索任务提供持续的能源和物质供应，是火星原位资源利用的重要方向。

研究微生物在火星表面环境的存活和适应性可为寻找地外生命以及为火星原位资源利用的微

生物筛选、定向微生物改造和资源利用效率的提高奠定基础;而该项研究在很大程度上依赖于重大试验设备的工程研制与集成,这对空间微生物试验技术以及设备研制提出了新挑战。

参考文献 (References)

- [1] JAKOSKY B M, PHILLIPS R J. Mars' volatile and climate history[J]. *Nature*, 2001, 412(6843): 237-244
- [2] 徐侃彦, 马玲玲, 印红, 等. 火星无人探测与行星保护[J]. *深空探测学报*, 2019, 6(1): 9-15
XU K Y, MA L L, YIN H, et al. Mars robotic exploration and planetary protection[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2019, 6(1): 9-15
- [3] COSPAR Panel on Planetary Protection, COSPAR policy on planetary protection[J]. *Space Research Today*, 2020, 208: 10-22
- [4] DAVILA A F, SKIDMORE M, FAIRÉN R G, et al. New priorities in the robotic exploration of Mars: the case for in situ search for extant life[J]. *Astrobiology*, 2010, 10(7): 705-710
- [5] FOX-POWELL M G, HALLSWORTH J E, COUSINS C R, et al. Ionic strength is a barrier to the habitability of Mars[J]. *Astrobiology*, 2016, 16(6): 427-442
- [6] GUO J, ZEITLIN C, WIMMER-SCHWEINGRUBER R F, et al. A generalized approach to model the spectra and radiation dose rate of solar particle events on the surface of Mars[J]. *The Astronomical Journal*, 2018, 155(1): 49-79
- [7] BAKERMANS C, TSAPIN A I, SOUZA-EGIPSY V, et al. Reproduction and metabolism at -10 °C of bacteria isolated from Siberian permafrost[J]. *Environmental Microbiology*, 2003, 5(4): 321-326
- [8] TAKAI K, NAKAMURA K, TOKI T, et al. Cell proliferation at 122 °C and isotopically heavy CH₄ production by a hyperthermophilic methanogen under high-pressure cultivation[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105: (31): 10949-10954
- [9] ROTHSCILD L J, MANCINELLI R L. Life in extreme environments[J]. *Nature*, 2001, 409: 1092-1101
- [10] CROCKER R M, AHARONIAN F. Fermi bubbles: giant, multibillion-year-old reservoirs of galactic center cosmic rays[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 106: 101102
- [11] CHANCELLOR J C, SCOTT G B I, SUTTON J P. Space radiation: the number one risk to astronaut health beyond low Earth orbit[J]. *Life*, 2014, 4(3): 491-510
- [12] ZEITLIN C, CLEGHORN T, CUCINOTTA F, et al. Overview of the Martian radiation environment experiment[J]. *Advances in Space Research*, 2004, 33(12): 2204-2210
- [13] HASSLER D M, ZEITLIN C, WIMMER-SCHWEINGRUBER R F, et al. Mars' surface radiation environment measured with the Mars Science Laboratory's Curiosity rover[J]. *Science*, 2014, 343(6169): 1244-1247
- [14] 王赤, 张贤国, 徐欣锋, 等. 中国月球及深空空间环境探测[J]. *深空探测学报*, 2019, 6(2): 105-118
WANG C, ZHANG X G, XU X F, et al. The lunar and deep space environment exploration in China[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2019, 6(2): 105-118
- [15] MATTHIA D, EHRESMANN B, LOHF H, et al. The Martian surface radiation environment: a comparison of models and MSL/RAD measurements[J]. *Journal of Space Weather & Space Climate*, 2016, 6: A13
- [16] GRONOFF G, NORMAN R B, MERTENS C J, et al. Computation of cosmic ray ionization and dose at Mars. I: A comparison of HZETRN and Planetocosmics for proton and alpha particles[J]. *Advances in Space Research: The Official Journal of the Committee on Space Research(COSPAR)*, 2015, 55: 1799-1805
- [17] MUSILOVA M, WRIGHT G, WARD J M, et al. Isolation of radiation-resistant bacteria from Mars analog Antarctic dry valleys by preselection, and the correlation between radiation and desiccation resistance[J]. *Astrobiology*, 2015, 15(12): 1076-1090
- [18] BELBE G M, TOFANĂ M. Effects of ionizing radiation on microbiological contaminants of foods[J]. *Environmental Technology*, 2010, 67: 178-185
- [19] CHEPTSOV V, VOROBYOVA E, BELOV A, et al. Survivability of soil and permafrost microbial communities after irradiation with accelerated electrons under simulated Martian and open space conditions[J]. *Geosciences*, 2018, 8(8): 298-322
- [20] VLADIMIR S C, ELENA A V, GEORGE A O, et al. Microbial activity in Martian analog soils after ionizing radiation: implications for the preservation of subsurface life on Mars[J]. *AIMS Microbiology*, 2018, 4(3): 541-562
- [21] CHEPTSOV V S, VOROBYOVA E A, MANUCHAROVA N A, et al. 100 kGy gamma-affected microbial communities within the ancient Arctic permafrost under simulated Martian conditions[J]. *Extremophiles*, 2017, 21(6): 1057-1067
- [22] SCHUERGER A C, MANCINELLI R L, KERN R G,

- et al. Survival of endospores of *Bacillus subtilis* on spacecraft surfaces under simulated Martian environments: implications for the forward contamination of Mars[J]. *Icarus*, 2003, 165(2): 253-276
- [23] COCKELL C S, ANDRADY A L. The Martian and extraterrestrial UV radiation environment-1: Biological and closed-loop ecosystem considerations[J]. *Acta Astronautica*, 1999, 44(1): 53-62
- [24] COCKELL C S. Ultraviolet radiation and the photobiology of Earth's early oceans[J]. *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 2000, 30(5): 467-499
- [25] KUHN W R, ATREYA S K. Solar radiation incident on the Martian surface[J]. *Journal of Molecular Evolution*, 1979, 14(1-3): 57
- [26] ROTHSCILD L J. Earth analogs for Martian life: microbes in evaporites, a new model system for life on Mars[J]. *Icarus*, 1990, 88(1): 246-260
- [27] MANCINELLI R L, BANIN A. Life on Mars? II: Physical restrictions[J]. *Advances in Space Research*, 1995, 15(3): 171-176
- [28] WASSMANN M, MOELLER R, RABOW E, et al. Survival of spores of the UV-resistant *Bacillus subtilis* strain MW01 after exposure to low-Earth orbit and simulated Martian conditions: data from the space experiment ADAPT on EXPOSE-E[J]. *Astrobiology*, 2012, 12(5): 498-507
- [29] COCKELL C S, SCHUERGER A C, BILLI D, et al. Effects of a simulated Martian UV flux on the *Cyanobacterium, Chroococcidiopsis* sp. 029[J]. *Astrobiology*, 2005, 5(2): 127-140
- [30] NEWCOMBE D A, SCHUERGER A C, BENARDINI J N, et al. Survival of spacecraft-associated microorganisms under simulated Martian UV irradiation[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2006, 71(12): 8147-8156
- [31] MANCINELLI R L, KLOVSTAD M. Martian soil and UV radiation: microbial viability assessment on spacecraft surfaces[J]. *Planetary & Space Science*, 2000, 48(11): 1093-1097
- [32] GREEN R H, TAYLOR D M, GUSTAN E A, et al. Survival of microorganisms in a simulated Martian environment[J]. *Space Life Sciences*, 1971, 3: 12-24
- [33] HAGEN C A, HAWRYLEWICZ E J, ANDERSON B T, et al. Effect of ultraviolet on the survival of bacteria airborne in simulated Martian dust clouds[J]. *Life Sciences & Space Research*, 1970, 8: 53-58
- [34] SMITH D J, SCHUERGER A C, DAVIDSON M M, et al. Survivability of psychrobacter cryohalolentis K5 under simulated Martian surface conditions[J]. *Astrobiology*, 2009, 9(2): 221-228
- [35] HORNECK G, RETTBERG P, GÜNTHER R, et al. Protection of bacterial spores in space, a contribution to the discussion on panspermia[J]. *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 2001, 31(6): 527-547
- [36] BILLI D V, CYPRIEN F, CLAUDIA N, et al. A desert cyanobacterium under simulated Mars-like conditions in low Earth orbit: implications for the habitability of Mars[J]. *Nature Reviews Cancer*, 2019, 19(2): 158-169
- [37] BERRY B J, JENKINS D G, SCHUERGER A C. Inhibition of *Escherichia coli* and *Serratia liquefaciens* under high-salt, low-pressure, and low temperature environments that approach surface conditions on Mars[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2010, 76(8): 2377-2386
- [38] BAUERMEISTER A, MAHNERT A, AUERBACH A, et al. Quantification of encapsulated bioburden in spacecraft polymer materials by cultivation-dependent and molecular methods[J]. *PLoS ONE*, 2014, 9(4): e94265
- [39] SCHUBERT W W, NEWLIN L, CHUNG S Y, et al. Assessment of bioburden encapsulated in bulk materials[J]. *Advances in Space Research*, 2016, 57(9): 2027-2036
- [40] HORNECK G, MOELLER R, CADET G, et al. Resistance of bacterial endospores to outer space for planetary protection purposes: experiment PROTECT of the EXPOSE-E mission[J]. *Astrobiology*, 2012, 12(5): 445-456
- [41] FLEMMING H C, WINGENDER J. The biofilm matrix[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2010, 8: 623-633
- [42] POLI A, ANZELMO G, NICOLAUS B. Bacterial exopolysaccharides from extreme marine habitats: production, characterization and biological activities[J]. *Mar Drugs*, 2010, 8(6): 1779-1802
- [43] XU J, CAMPBELL J M, ZHANG N, et al. Did mineral surface chemistry and toxicity contribute to evolution of microbial extracellular polymeric substances[J]. *Astrobiology*, 2012, 12(8): 785-798
- [44] FROESLER J, PANITZ C, WINGENDER J, et al. Survival of *Deinococcus geothermal* is in biofilms under desiccation and simulated space and Martian conditions[J]. *Astrobiology*, 2017, 17(5): 431-447
- [45] MICKAEL B, SCALZI G, RABOW E, et al. Biofilm and planktonic lifestyles differently support the resistance of

- the desert cyanobacterium *Chroococcidiopsis* under space and Martian simulations[J]. *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 2013, 43(4-5): 377-389
- [46] SIMON G, SMARANDACHE A, IANCU V, et al. Stability of antimicrobial drug molecules in different gravitational and radiation conditions in view of applications during outer space missions[J]. *Molecules*, 2021, 26(8): 2221
- [47] HECHT M H, KOUNAVES S P, QUINN R C, et al. Detection of perchlorate and the soluble chemistry of Martian soil at the Phoenix lander site[J]. *Science*, 2009, 325(5936): 64-67
- [48] GLAVIN D P, GROTZINGER J P. Evidence for perchlorates and the origin of chlorinated hydrocarbons detected by SAM at the Rocknest aeolian deposit in Gale Crater[J]. *The Journal of Geophysical Research Planets*, 2013, 118(10): 1955-1973
- [49] OJHA L, WILHELM M B, MURCHIE S L, et al. Spectral evidence for hydrated salts in recurring slope lineae on Mars[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8(11): 829-832
- [50] CLARK B C, MORRIS R V, MCLENNAN S M, et al. Chemistry and mineralogy of outcrops at meridiani planum [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 240(1): 73-94
- [51] CRISLER J D, NEWVILLE T M, CHEN F, et al. Bacterial growth at the high concentrations of magnesium sulfate found in Martian soils[J]. *Astrobiology*, 2012, 12(2): 98-106
- [52] WILKS J M, CHEN F, CLARK B C, et al. Bacterial growth in saturated and eutectic solutions of magnesium sulphate and potassium chlorate with relevance to Mars and the ocean worlds[J]. *International Journal of Astrobiology*, 2019, 18(6): 502-509
- [53] BERRY B J, JENKINS D G, SCHUERGER A C. Effects of simulated Mars conditions on the survival and growth of *Escherichia coli* and *Serratia liquefaciens*[J]. *Applied & Environmental Microbiology*, 2010, 76(8): 2377-2386
- [54] NICHOLSON W L, MCCOY L E, KERNEY K R, et al. Aqueous extracts of a Mars analogue regolith that mimics the Phoenix landing site do not inhibit spore germination or growth of model spacecraft contaminants *Bacillus subtilis* 168 and *Bacillus pumilus* SAFR-032[J]. *Icarus*, 2012, 220(2): 904-910
- [55] SCHUERGER A C, GOLDEN D C, MING D W. Biotoxicity of Mars soils: 1. Dry deposition of analog soils on microbial colonies and survival under Martian conditions[J]. *Planetary & Space Science*, 2012, 72(1): 91-101
- [56] WADSWORTH J, COCKELL C S. Perchlorates on Mars enhance the bacteriocidal effects of UV light[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 4662-4673
- [57] FESHANGSAZ N, SEMSARHA F, TACKALLOU S H, et al. Survival of the halophilic archaeon *Halovarius luteus* after desiccation, simulated Martian UV radiation and vacuum in comparison to *Bacillus atrophaeus*[J]. *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 2020, 50: 157-173
- [58] 袁俊霞, 张美资, 印红, 等. 空间环境对微生物的影响及应用[J]. *中国载人航天*, 2016, 22(4): 354-364
- YUAN J X, ZHANG M Z, YIN H, et al. Effect of space environment on microorganisms and its application[J]. *China Manned Space*, 2016, 22(4): 354-364
- [59] VERA J P D. Lichens as survivors in space and on Mars[J]. *Fungal Ecology*, 2012, 5(4): 472-479
- [60] RABOW E, RETTBERG P, BARCZYK S, et al. EXPOSE-E: an ESA astrobiology mission 1.5 years in space[J]. *Astrobiology*, 2012, 12(5): 374-386
- [61] NEUBERGER K, LUX-ENDRICH A, PANITZ C, et al. Survival of spores of *Trichoderma longibrachiatum* in space: data from the space experiment SPORES on EXPOSE-R[J]. *International Journal of Astrobiology*, 2014, 14(1): 129-135
- [62] PACELLI C, SELBMANN L, ZUCCONI L, et al. Responses of the black fungus *Cryomyces antarcticus* to simulated Mars and space conditions on rock analogues[J]. *Astrobiology*, 2019, 19(1): 209-220
- [63] PANITZ C, HORNECK G, RABOW E, et al. The SPORES experiment of the EXPOSE-R mission: *Bacillus subtilis* spores in artificial meteorites[J]. *International Journal of Astrobiology*, 2015, 14(1): 105-114
- [64] PANITZ C, FRÖSLER J, WINGENDER J, et al. Tolerances of *Deinococcus geothermalis* biofilms and planktonic cells exposed to space and simulated Martian conditions in low Earth orbit for almost two years[J]. *Astrobiology*, 2019, 19(8): 979-994
- [65] PODOLICH O, KUKHARENKO O, HAIDAK A, et al. Multimicrobial kombucha culture tolerates Mars-like conditions simulated on low-Earth orbit[J]. *Astrobiology*, 2018, 19(2): 183-196
- [66] 首次! 神十六乘组开展舱外辐射生物学暴露实验[EB/OL]. [2023-06-16]. <https://news.cctv.com/2023/06/>

- 16/ARTIHj4AZWvNVBUtDAMeIsnD230616.shtml
- [67] 中国空间站第五批实验样品正展开研究, 空间辐射暴露实验有哪些新发现?[EB/OL]. [2023-11-14]. <https://news.yangtse.com/content/1776656html>
- [68] COCKELL C S, OLSSON-FRANCIS K. Experimental methods for studying microbial survival in extraterrestrial environments[J]. *Journal of Microbiological Methods*, 2010, 80(1): 1-13
- [69] MARTI E M, ZORZANO M P, PRIETO-BALLESTEROS O, et al. A chamber for studying planetary environments and its application to astrobiology: stability of liquid saline water on present day Mars[J]. *Paleontological Journal*, 2012, 46(9): 1076
- [70] SOBRADO J M, MARTÍN-SOLER J, MARTÍN-GAGO J A. Mimicking Mars: a vacuum simulation chamber for testing environmental instrumentation for Mars exploration[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(3): 035111-035118
- [71] HERNY C, CONWAY S J, RAACK J, et al. Downslope sediment transport by boiling liquid water under Mars-like conditions: experiments and potential implications for Martian gullies[J]. *Geological Society London Special Publications*, 2018, 467: 373-410
- [72] OLSSON F K, TORRE R D L, TOWNER M C, et al. Survival of akinetes (resting-state cells of cyanobacteria) in low Earth orbit and simulated extraterrestrial conditions[J]. *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 2009, 39: 565-579
- [73] GÓMEZ F, MATEO-MARTÍ E, PRIETO-BALLESTEROS O, et al. Protection of chemolithoautotrophic bacteria exposed to simulated Mars environmental conditions[J]. *Icarus*, 2010, 209(2): 482-487
- [74] VEGA U P D, RETTBERG P, REITZ G. Simulation of the environmental climate conditions on Martian surface and its effect on *Deinococcus radiodurans*[J]. *Advances in Space Research*, 2007, 40(11): 1672-1677
- [75] VERA J P D, MOEHLMANN D, BUTINA F, et al. Survival potential and photosynthetic activity of lichens under Mars-like conditions: a laboratory study[J]. *Astrobiology*, 2010, 10(2): 215-227
- [76] SANCHEZ F J, MATEO-MARTI E, RAGGIO J, et al. The resistance of the lichen *Circinaria gyrosa* (nom. provis.) towards simulated Mars conditions: a model test for the survival capacity of an eukaryotic extremophile[J]. *Planetary & Space Science*, 2012, 72(1): 102-110
- [77] GALLETTA G, FERRI F, FANTI G, et al. S. A. M., The Italian Martian simulation chamber[J]. *Origins of Life and Evolution of Biosphere*, 2006, 36(5-6): 625-627
- [78] LOTTER H S, RADAX C, GRUBER C, et al. Astrobiology with haloarchaea from Permo-Triassic rock salt[J]. *International Journal of Astrobiology*, 2003, 4: 271-284

(编辑: 王 洋)

一作简介: 马玲玲, 高级工程师, 主要从事空间微生物防控技术的研究。

*通信作者: 印 红, 研究员, 主要从事空间微生物防控技术的研究。